DOI:10.12441/spyswjs.20250309001 [文章编号] 1673-1689(2026)02-0066-12

梨果仙人掌多糖提取优化、结构表征及抗氧化活性研究

黄思源[1] 赵 亮[2] 陈达菊[3] 周 峰[1*]

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院,北京 100083; 2. 北京工商大学食品与健康学院,北京 100048; 3. 文山菁啊妞农业有限公司,云南 文山 663099)

摘要:【目的】优化梨果仙人掌多糖的提取工艺,在降低蒽醌残留的同时提高多糖得率,并对所得多糖进行结构表征及抗氧化活性评价。**【方法】**采用热水浸提法,通过单因素及正交试验优化提取参数;利用乙醇多次洗涤沉淀以去除蒽醌类成分;利用紫外光谱(UV)、傅里叶红外光谱(FT-IR)、高效凝胶渗透色谱(HPGPC)等对其结构及单糖组成进行表征;通过测定DPPH自由基清除率及氧自由基吸收能力(ORAC)评价其体外抗氧化活性;建立H_2O_2诱导的HepaRG细胞氧化应激模型,检测细胞活力,并测定细胞内活性氧(ROS)水平及谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、丙二醛(MDA)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)水平。**【结果】**最优提取条件为提取温度70 ℃、提取时间2.5 h、料液比1 g∶30 mL。结构表征显示,所得多糖重均分子量主要分布于722.3×10^3、50.6×10^3和1.6×10^3,由甘露糖、葡萄糖醛酸、鼠李糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖、岩藻糖9种单糖组成。该多糖对DPPH自由基的清除率为96.27%,ORAC值为0.66 mmol/L。在细胞模型中,梨果仙人掌多糖(2.50、5.00 mg/mL)可显著提升HepaRG细胞内CAT、SOD、GSH-Px活性,降低MDA和ROS水平。**【结论】**优化后的提取工艺可有效提高多糖得率,所得多糖为高纯度杂多糖。该多糖在体外及细胞水平均表现出显著的抗氧化活性,其作用机制与调控氧化应激相关生物标志物有关,可作为功能性食品领域的天然抗氧化剂。

关键词:梨果仙人掌;多糖;提取;蒽醌;结构表征;抗氧化

Extraction Process Optimization, Structural Characterization, and Antioxidant Activity Evaluation of Polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

HUANG Siyuan[1] *ZHAO Liang*[2] *CHEN Daju*[3] *ZHOU Feng*[1*]

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. Wenshan Jing'a'niu Agriculture Co., Ltd., Wenshan 663099, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to optimize the extraction process of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., improve the polysaccharide yield while reducing anthraquinone residue, and characterize the structure and evaluate the antioxidant activity of the obtained polysaccharides. [**Method**] The hot water extraction parameters were optimized by single factor and orthogonal tests. The anthraquinone residue was reduced by repeated washing with ethanol. The polysaccharide structure and composition were characterized by ultraviolet (UV) spectroscopy, Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy, and high performance gel permeation chromatography (HPGPC). The DPPH radical scavenging rate and oxygen radical absorbance capacity (ORAC)

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2024YFF1106504)。

通信作者:周峰(1980—),男,博士,副教授,博士研究生导师,主要从事天然活性成分功能评价研究。E-mail:zf@cau.edu.cn

收稿日期:2025-03-09 **修回日期:**2025-05-21

were measured to evaluate the *in vitro* antioxidant capacity. A HepaRG cell model of H_2O_2-induced oxidative stress was established, and the cell viability, intracellular reactive oxygen species (ROS) level, and the levels of glutathione peroxidase (GSH-Px), malondialdehyde (MDA), catalase (CAT), and superoxide dismutase (SOD) were determined. [**Result**] The optimal extraction conditions were extraction with a solid-to-liquid ratio of 1 g∶30 mL at 70 ℃ for 2.5 h. Structural characterization revealed three main weight-average molecular weights: 722.3×10^3, 50.6×10^3, and 1.6×10^3. The polysaccharides consisted of 9 monosaccharides: mannose, glucuronic acid, rhamnose, galacturonic acid, glucose, galactose, xylose, arabinose, and fucose. The polysaccharides exerted the DPPH scavenging rate of 96.27% and the ORAC value of 0.66 mmol/L. The cell experiment showed that the polysaccharides (2.50 mg/mL and 5.00 mg/mL) significantly enhanced the activities of CAT, SOD and GSH-Px, while lowering the levels of MDA and ROS in the model HepaRG cells. [**Conclusion**] The optimized extraction process significantly improves the polysaccharide yield, and the obtained polysaccharides are high-purity heteropolysaccharides. Both *in vitro* and cell experiments demonstrate that the polysaccharides exhibit significant antioxidant activity, and its mechanism of action is associated with the regulation of oxidative stress-related biomarkers, highlighting its potential as a natural antioxidant for functional food applications.

Keywords: *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.; polysaccharide; extraction; anthraquinone; structural characterization; antioxidant activity

梨果仙人掌（*Opuntia ficus-indica*（L.）Mill.，OFI）隶属于仙人掌科（Cactaceae），主要生长于热带及亚热带地区，起源于墨西哥[1]。20世纪90年代末，梨果仙人掌被引入我国，随后在西南地区归化，成为干热河谷地带的常见物种[2]。其健康效益备受关注，相关产业化开发与功能活性研究已成为健康食品领域的热点。该植物的果肉、果皮、叶状茎和种子等多个部位，在多种疾病的辅助治疗中均有应用[3]。

从仙人掌中提取得到的水溶性黏液是一种中性多糖（简称ODP），具有多种药理学功能，如降血脂、抗糖尿病、免疫刺激和促进伤口愈合等[4-6]。众多学者致力于探究天然多糖的生物功效，关注其在调节血糖、增强免疫力、抗氧化等方面的作用[7]，因此ODP具有作为新型功能食品补充剂的开发潜力。研究发现，天然多糖可以抑制ROS的生成，从而抑制ROS引发的氧化应激[8]，进而减少由氧化应激诱发的多种疾病风险，包括糖尿病、阿尔茨海默病和癌症等[9]。

现有研究对仙人掌多糖抗氧化活性的探讨相对较少，多集中于其他具有抗氧化活性的植物化学物。有研究发现，梨果仙人掌果胶清除DPPH自由基的活性与二丁基羟基甲苯（BHT）相当，可作为抗氧化剂应用于食品和医药领域[10]。另有研究表明，梨果仙人掌所含的不饱和脂肪酸具有抗氧化作用，使其适于作为化妆品成分[11]。对不同部位梨果仙人掌多酚的提取研究发现，其抗氧化活性与酚类化合物含量呈高度相关性[12-18]。因此，本研究主要围绕梨果仙人掌多糖的抗氧化活性展开探讨。

目前，仙人掌多糖的提取方法主要包括传统热水提取、微波辅助提取、超声辅助提取和酶法提取等[19]。微波辅助提取省时高效，但可能会破坏多糖化学结构，且设备成本和操作技术要求较高[20]；超声辅助提取成本低、重复性好、操作简便，但在特定条件下可能损伤多糖结构，从而影响其生物活性[21]；酶法提取具有耗时短、效率高、流程简单及节能等优点，但用酶量较大，且提取及降解过程需精确控制温度[22-23]。尽管已有研究对ODP的提取工艺进行了优化[24]，但热水提取法仍因其操作便捷、成本低廉且能较好地保持多糖活性等优势，成为获得多糖的经典和主要方法[25-27]。

梨果仙人掌中可能存在蒽醌类化合物。蒽醌（anthraquinone，AQ）是一种芳香族有机化合物，属于含氧多环芳烃（oxy-PAH）亚族。AQ在人体代谢过程中可产生有害物质，对肝脏和肾脏造成损伤，长期摄入可能导致肝肾功能异常，危害健康。醌类物质可通过与相应半醌类物质发生氧化还原反应生成ROS，破坏细胞结构，进而对血管、肺等产生不良影响[28-31]。研究表明，AQ具有潜在的致突变性和致癌性，其毒性已经得到深入研究[32]。鉴于其健康风险，2017年，世界卫生组织国

际癌症研究机构将蒽醌列入2B类致癌物清单，即对人体具有潜在致癌性的物质。

因此，本研究拟采用热水提-醇沉法提取梨果仙人掌多糖，采用单因素结合正交试验法，系统考察料液比、提取时间、提取温度等关键参数对多糖得率的影响，以建立兼顾效率与活性的提取工艺。在此基础上，于提取工艺优化中引入蒽醌脱除技术，通过乙醇梯度洗脱实现活性组分分离，旨在降低多糖提取物中的杂质干扰。对所得多糖组分的结构进行表征，并通过体外抗氧化测试及细胞模型评价其抗氧化活性。通过将细胞氧化损伤模型引入ODP活性评价方案，构建体外-细胞双模型联动验证方法，为阐释其抗氧化分子机制提供多维度证据。本研究结果可为后续开发高附加值功能食品和医美原料提供理论依据，对推动西南地区特色生物资源的高值化利用具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

梨果仙人掌：文山菁啊妞农业有限公司；体积分数95%乙醇、葡萄糖、苯酚、硫酸（分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；溴化钾（色谱纯）：北京谱析科技有限公司；磷酸盐缓冲液（PBS）、奎诺二甲基丙烯酸酯（Trolox）、1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、荧光素钠、2，2’-偶氮二（2-甲基丙基脒）二盐酸盐（AAPH）、二甲基亚砜（DMSO）：上海源叶生物科技有限公司；人肝癌细胞HepaRG：北京协和细胞资源中心；RPMI 1640培养基、胰蛋白酶、CCK-8检测试剂盒：北京索莱宝科技有限公司；胎牛血清（FBS）：浙江天航生物科技股份有限公司；过氧化氢（H_2O_2）溶液（2 mg/mL）：上海麦克林生化科技股份有限公司；ROS、MDA、CAT、SOD、GSH-Px检测试剂盒：南京建成生物工程研究所；RIPA裂解液、BCA蛋白质质量浓度测定试剂盒：碧云天生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

电热真空干燥箱：DZF-6050型，北京利康达圣科技发展有限公司；冷冻干燥机：LGJ-25C型，四环福瑞科仪科技发展（北京）有限公司；数显恒温水浴锅：HH-S6型，荣华仪器制造有限公司；多功能酶标仪：SpectraMax M2e型，美国Molecular Devices公司；高效液相色谱仪：LC-10Avp型，日本岛津公司；傅里叶变换红外光谱仪：SPECTRUM 100型，赛默飞世尔科技（中国）有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理及多糖提取工艺

取新鲜梨果仙人掌，洗净、脱刺后，切成1 cm见方小块，于80 ℃烘箱中烘至恒质量；随后置于破壁机中粉碎，过80目筛，抽真空保存备用。称取预处理后的仙人掌粉末，在不同提取温度、提取时间、料液比等条件下进行提取。将所得多糖浸提液蒸发浓缩后，加入4倍体积的体积分数95%乙醇，于室温静置过夜[33]。之后在5 000 r/min转速下离心10 min，收集沉淀，经冷冻干燥后即得仙人掌多糖。

1.3.2 仙人掌多糖提取工艺优化

选取料液比、提取温度、提取时间作为影响因素进行单因素试验，以仙人掌多糖得率为评价指标。

1）固定提取温度75 ℃、提取时间2.0 h，考察料液比1 g∶10 mL、1 g∶15 mL、1 g∶20 mL、1 g∶25 mL、1 g∶30 mL对仙人掌多糖得率的影响。

2）固定料液比1 g∶20 mL、提取时间2.0 h，考察提取温度65、70、75、80、85 ℃对仙人掌多糖得率的影响。

3）固定料液比为1 g∶20 mL、提取温度75 ℃，考察提取时间1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h对仙人掌多糖得率的影响。

1.3.3 正交试验设计

在单因素试验基础上，选取提取温度（*A*）、提取时间（*B*）、料液比（*C*）为影响因素，以多糖得率为评价指标，采用三因素三水平正交试验设计对仙人掌多糖提取工艺进行优化。

1.3.4 多糖质量分数测定

多糖质量分数测定参照文献[34]。分别配制0.1 mg/mL葡萄糖标准溶液和质量浓度50.5 g/L苯酚溶液。取6支试管，分别加入0、0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 mL标准溶液，用蒸馏水补足至2.0 mL。再向各管中加入1.0 mL苯酚溶液，混匀静置后加入5.0 mL硫酸混匀，于50 ℃水浴条件下静置反应15 min。取出冷却至室温，于490 nm波长下测定吸光度并绘制标准曲线。取2.0 mL样品溶液，相同方法处理后，于490 nm处测定吸光度。根据标

准曲线计算样品中总糖质量浓度。按照式(1)计算仙人掌多糖得率。

$$Y=(C\times V)/m\times 100\times 100\% \quad (1)$$

式中：

Y——仙人掌多糖得率，%；

C——提取液总糖质量浓度，mg/mL；

V——提取液体积，mL；

m——仙人掌粉质量，g；

100——稀释倍数。

1.3.5 杂质脱除与成分测定

基于蒽醌可溶于有机溶剂的特性，采用乙醇对多糖沉淀进行多次洗脱，分为初始组、醇沉1组、醇沉2组、醇沉3组，以降低其中蒽醌类物质的残留。此外，提取得到的仙人掌多糖可能含有皂苷、多酚、生物碱等成分，会影响其纯度，并可能干扰后续的结构表征与功能评价。为此，采用香草醛-高氯酸比色法测定皂苷质量浓度[35]，采用Folin-Ciocalteu比色法测定多酚质量浓度[36]，采用分光光度法测定生物碱质量浓度[37]。

1.3.6 结构表征

1)重均分子量测定：采用高效凝胶色谱法(HPGPC)测定多糖的重均分子量及其分布[38]。使用LC-10Avp高效液相色谱系统，配备RID-10A示差折光检测器、TSK-gel G-3000 PWXL色谱柱及CLASS-Vp工作站。以0.2 mol/L NaCl水溶液为流动相，流量为0.6 mL/min。

2)单糖组成分析：称取1.0 mg样品于水解管中，加入1.0 mL盐酸-甲醇溶液，充氮气密封后，于80 ℃金属浴中反应16 h，反应结束后用氮气吹干。随后加入1.0 mL的2 mol/L三氟乙酸于120 ℃反应1 h进行彻底水解。再次吹干后，对水解产物进行衍生化处理，采用高效液相色谱法进行分析。

3)傅里叶变换红外光谱分析：取0.02 mg仙人掌多糖样品，与干燥的溴化钾粉末以1∶100的质量比充分混合并研磨均匀，压制成透明薄片。以溴化钾压片作为空白背景，在4 000~400 cm^{-1}波数范围内进行扫描。

4)紫外-可见光谱扫描：将仙人掌多糖样品配制成0.1 mg/mL的溶液，在200~400 nm波长范围内进行扫描。

1.3.7 体外抗氧化活性测定

1) DPPH自由基清除能力测定参照文献[39]。精确称取7.9 mg DPPH，用无水乙醇溶解并定容至100 mL，配制成0.2 mmol/L的DPPH溶液。取2份2.0 mL DPPH溶液，分别与2.0 mL无水乙醇、2.0 mL样品混匀；另取2.0 mL样品和2.0 mL无水乙醇混匀。每个样品均设置3个平行试管。混匀后静置，以4 500 r/min离心10 min。于517 nm波长处测定吸光度，按照式(2)计算DPPH自由基清除率。

$$S=[1-(A_i-A_j)/A_c]\times 100\% \quad (2)$$

式中：

S——DPPH自由基清除率，%；

A_i——加入样品和DPPH溶液后的吸光度；

A_j——加入样品和无水乙醇后的吸光度；

A_c——加入无水乙醇和DPPH溶液后的吸光度。

2)用50 mmol/L、pH 7.4的PBS配制浓度梯度为0.02、0.04、0.06、0.08、0.20 mmol/L的Trolox标准溶液。取20 μL待测样品或Trolox标准溶液，于96孔板中混合，37 ℃孵育平衡。加入20 μL以PBS配制的1.25 μmol/L的荧光素钠溶液，于37 ℃孵育5 min后，加入140 μL 140 mmol/L的AAPH溶液，振荡混匀。设置酶标仪的激发波长为485 nm，发射波长为538 nm，时间间隔为4 min，持续监测3 h。最终ORAC值以Trolox当量(mmol/L)表示[40]。

1.3.8 H_2O_2诱导的HepaRG细胞氧化应激模型构建

1)细胞培养：将HepaRG细胞接种于RPMI 1640培养基中，于37 ℃、体积分数5% CO_2的培养箱中培养。当细胞汇合度达到80%以上时，使用含有质量分数0.25% EDTA的胰蛋白酶消化2 min，然后按照1∶3的比例传代，并根据所需细胞密度将其接种于培养板中[41]。

2)H_2O_2诱导的氧化应激模型建立及分组给药：采用H_2O_2诱导的HepaRG细胞建立氧化应激模型。将细胞接种于96孔板培养24 h后，弃去培养基，用PBS洗涤2次，分别加入含0、50、100、150、200、250、300、400、500 μg/mL H_2O_2的RPMI 1640培养基，继续培养12 h。测定细胞存活率，筛选合适的H_2O_2诱导质量浓度。按照上述方法选用合适质量浓度的H_2O_2处理细胞，培养12 h后更换含有不同质量浓度(0、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00、2.00、2.50、5.00 mg/mL)仙人掌多糖提取物的RPMI 1640培养基，继续培养24 h。再次测定细胞存活率，以筛选仙人掌多糖提取物的合适干预质量浓度。对照组为未经H_2O_2处理的细胞，使用正

常 RPMI 1640 培养基培养，用于评估细胞在正常状态下的各项指标；模型组为经 200 μg/mL H_2O_2 处理 12 h、未添加仙人掌多糖的细胞，用于建立氧化应激模型，评估 H_2O_2 诱导的细胞损伤状态。

3）细胞活性检测：采用 CCK-8 法检测细胞活性。取对数生长期细胞接种于 96 孔板，在 37 °C、体积分数 5% CO_2 条件下培养 24 h。弃去原培养基，分别更换为含有不同质量浓度 H_2O_2 或不同质量浓度仙人掌多糖提取物的新鲜培养基，继续培养 24 h。随后向每孔中加入 10 μL CCK-8 溶液，继续孵育 30 min 后，测定 450 nm 处吸光度。根据试剂盒说明书计算细胞活性，确定 H_2O_2 的适宜造模质量浓度及仙人掌多糖提取物的安全质量浓度范围。

4）ROS 检测：采用 DCFH-DA 荧光探针法检测细胞内 ROS 水平。将各处理组细胞接种于 96 孔板上，培养 24 h，弃去培养液，用 PBS 洗涤 2 次。每孔加入 200 μL 10 μmol/L 的 DCFH-DA 工作液，于 37 ℃避光孵育 30 min。使用酶标仪测定荧光强度，激发波长为 488 nm，发射波长为 525 nm。

5）MDA、SOD、GSH-Px、CAT 水平检测：HepaRG 细胞分组后，弃去培养液，用 PBS 洗涤 2 次。每孔加入适量 RIPA 裂解液，用移液枪轻轻吹打数次，并使细胞充分裂解后，离心并收集上清液。按照相应试剂盒说明书测定。

1.4 数据处理

所有数据均以平均值±标准偏差表示。采用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析。使用 PrismPad Prism 10 软件作图及差异显著性标注，$P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

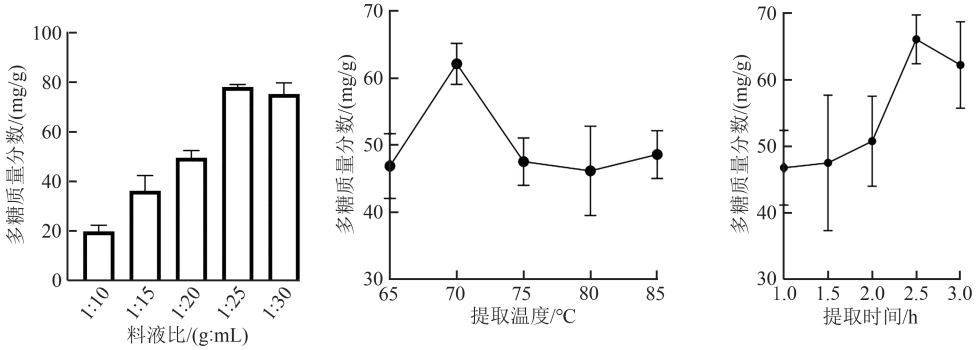
2.1 不同因素及正交试验结果

2.1.1 单因素对仙人掌多糖得率的影响

在料液比、提取温度及提取时间 3 个因素中，固定其中 2 种因素，考察另外 1 种因素对仙人掌多糖得率的影响，结果见图 1。由图 1（a）可知，在料液比 1 g∶10 mL 到 1 g∶25 mL 区间内，多糖质量分数随料液比的减小而提高，当料液比为 1 g∶25 mL 时达到最大值，表明此时多糖已充分溶出。继续减小料液比，多糖质量分数有所下降，但与峰值无显著差异。这可能是因为过量的溶剂会引发竞争性溶出效应，在促进部分杂质溶解的同时，反而抑制了多糖的溶出效率。

由图 1（b）可知，在提取温度 65~70 ℃范围内，多糖质量分数随温度的升高而增加，这可能是因为温度升高加速了分子热运动，促进了仙人掌多糖溶出。当温度为 70 ℃时，多糖质量分数达到最高。随温度继续升高，多糖质量分数呈下降趋势，推测是由于过高的温度导致多糖结构破坏或在溶剂中发生降解所致。

由图 1（c）可知，在提取时间 2.5 h 之前，多糖质量分数随提取时间的延长而增加，较长的提取时间有利于多糖充分溶出。当提取时间为 2.5 h 时，多糖质量分数最大。延长至 3.0 h 时，多糖质量分数有所下降，但与 2.5 h 时的峰值无显著差异，表明进一步延长提取时间对提高多糖得率无显著作用。



(a) 料液比对仙人掌多糖得率的影响　(b) 提取温度对仙人掌多糖得率的影响　(c) 提取时间对仙人掌多糖得率的影响

图 1　不同因素对多糖得率的影响

Fig. 1　Effect of different factors on the polysaccharide yield

2.1.2　正交试验

在单因素试验的基础上，参照$L_9(3^4)$正交表，进行三因素三水平正交试验设计，对影响仙人掌多糖得率的各因素进行正交试验。因素水平见表1。

表1　正交试验因素水平

Table 1　Factors and levels of orthogonal test

水平	提取温度/℃	提取时间/h	料液比/(g∶mL)
1	65	2.0	1∶20
2	70	2.5	1∶25
3	75	3.0	1∶30

正交试验结果分析见表2。正交试验结果表明，3个因素对仙人掌多糖得率影响的主次顺序为：提取温度>提取时间>料液比，且多糖得率最高的组合为提取时间2.5 h、料液比1∶30、提取温度70 ℃。因其未出现在正交表中，后期进行验证试验，提取出来的仙人掌多糖质量浓度为3.67 mg/mL。正交表中最高组合的仙人掌多糖质量浓度为3.66 mg/mL，验证试验的提取多糖质量浓度高于正交试验的最高组合。

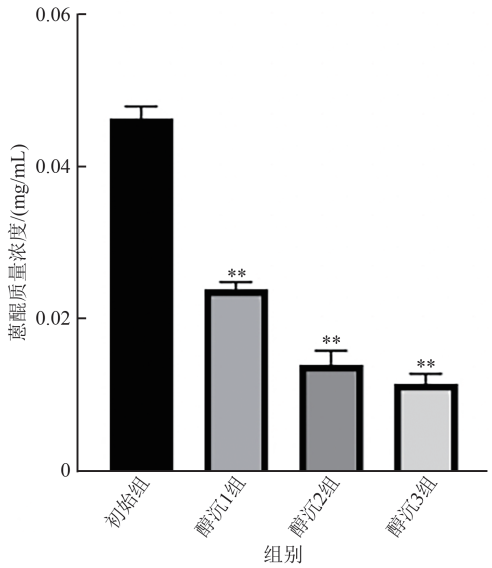
表2　正交试验结果分析

Table 2　Analysis of orthogonal test results

组别	提取温度/℃	料液比/(g∶mL)	提取时间/h	多糖得率/(mg/mL)
1	65	1∶20	2.0	2.69
2	75	1∶25	2.0	2.75
3	70	1∶30	2.0	3.38
4	75	1∶20	2.5	3.10
5	70	1∶25	2.5	3.41
6	65	1∶30	2.5	3.33
7	70	1∶20	3.0	3.66
8	65	1∶25	3.0	2.87
9	75	1∶30	3.0	3.05
最佳水平	70	1∶30	2.5	
R	0.52	0.25	0.34	

2.2　蒽醌的脱除

本研究采用乙醇对多糖沉淀物进行多次洗脱，以最大限度地降低其中蒽醌类物质的残留，从而减少其潜在的毒性风险。如图2所示，初始组沉淀物中蒽醌质量浓度为0.046 mg/mL，经3次乙醇洗脱后，醇沉3组沉淀物中蒽醌质量浓度降至0.011 mg/mL，且与前次洗脱后相比已无显著差异。目前，尚未有权威机构制定蒽醌在食品中的明确健康指导值。谢倩倩等[42]基于大鼠90 d经口毒性试验结果，采用200倍不确定系数外推至人体，建立了蒽醌的每日允许摄入量为6.8 μg/kg。黄媛等[43]通过总结含蒽醌中成药的每日最小服用量，推算出蒽醌类化合物的每日最低摄入量约为0.3 mg。本研究提取得到的仙人掌多糖中蒽醌残留水平在常规摄入量下远低于上述毒理学参考值。



**与初始组相比差异极显著（P<0.000 1）。

图2　蒽醌质量浓度的变化

Fig. 2　Changes in mass concentration of anthraquinone

2.3　其他成分测定结果

分别采用相应方法建立标准曲线并进行定量分析。皂苷测定的标准曲线方程为y=27.749x+0.056 3，R^2=0.994 6，据此计算得到仙人掌多糖中皂苷的质量浓度为0.082 mg/mL。多酚测定的标准曲线方程为y=50.419x+0.041 2，R^2=0.999 7，计算得到多酚质量浓度为0.016 mg/mL。生物碱测定的标准曲线方程为y=1.491 7x+2.777 9，R^2=0.991 0，计算得到生物碱质量浓度为0.223 mg/mL。这3种成分的质量浓度均显著低于多糖（P<0.05），表明所得多糖样品的纯度较高。

2.4　结构表征结果

2.4.1　重均分子量与分布

采用HPGPC分析重均分子量，结果如图3所示。仙人掌多糖样品中存在3个主要组分，其保留时间分别为9.021、11.601、14.930 min，对应的重均

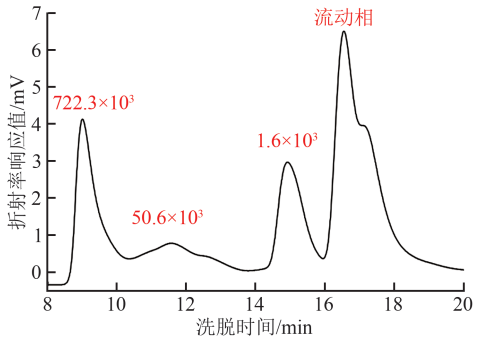


图 3 多糖的 HPSEC 色谱图

Fig. 3 HPSEC chromatogram of polysaccharides

分子量分别为 722.3×10³、50.6×10³ 和 1.6×10³。出现 3 个吸收峰意味着本样品中存在 3 种不同分子量范围的组分。

2.4.2 单糖组成分析

单糖组成分析结果见图 4。该仙人掌多糖主要由甘露糖（Man）、葡萄糖醛酸（GlcA）、鼠李糖（Rha）、半乳糖醛酸（GalA）、葡萄糖（Glc）、半乳糖（Gal）、木糖（Xyl）、阿拉伯糖（Ara）、岩藻糖（Fuc）共 9 种单糖组成，其摩尔比为 0.3∶1.0∶10.9∶9.4∶1.8∶27.6∶12.5∶33.0∶3.5。文献报道的单糖组成因仙人掌品种及产地不同而有所差异。Zhao 等[44]研究表明，单刺仙人掌多糖主要由鼠李糖、葡萄糖组成，并含有少量阿拉伯糖、甘露糖以及葡萄糖醛酸；Cai 等[24]的研究结果表明，米邦塔仙人掌多糖组分 F1 由阿拉伯糖、木糖、半乳糖构成，同时含有少量鼠李糖、葡萄糖、甘露糖；赵倩[45]报道西藏梨果仙人掌多糖中葡萄糖含量最高，其次为阿拉伯糖和半乳糖，并含有少量木糖、半乳糖醛酸、鼠李糖、甘露糖、葡萄糖醛酸。本研究测定的云南文山州梨果仙人掌多糖，其单糖组成与上述研究结果

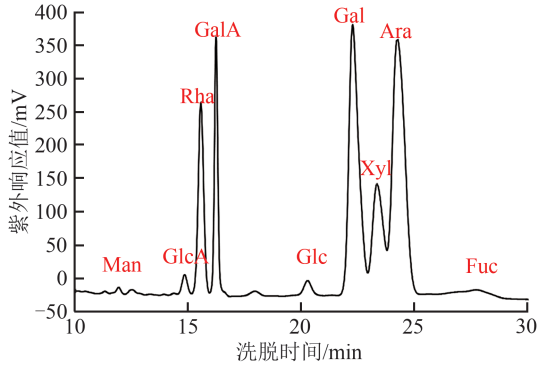


图 4 单糖组成色谱

Fig. 4 Monosaccharide composition chromatogram

相近，均以阿拉伯糖、半乳糖、木糖、鼠李糖等为主要成分，但葡萄糖占比相对较低。这种差异可能与产地特定的气候、土壤条件有关，也可能源于多糖本身的结构异质性。

2.4.3 傅里叶变换红外光谱分析

仙人掌多糖的红外光谱见图 5。在 3 500~3 000 cm^{-1} 范围出现较宽的吸收峰，主要是多糖分子内与分子间 O—H 及 N—H 键的伸缩振动所致。位于 1 700~1 600 cm^{-1} 范围内的特征吸收峰主要是由 COOH 的 C＝O 伸缩振动引起，表明样品中含有半乳糖醛酸或葡萄糖醛酸等糖醛酸成分。约 1 400 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 C—H 的弯曲振动。1 060 cm^{-1} 附近的强吸收峰是吡喃糖环的典型特征，源于糖环上 C—O—C 与 C—O—H 结构中 C—O 键的伸缩振动。此外，在 600 cm^{-1} 附近出现的吸收峰可能源于羧基的伸缩振动，这与葡萄糖、阿拉伯糖等单糖的结构特征相符。

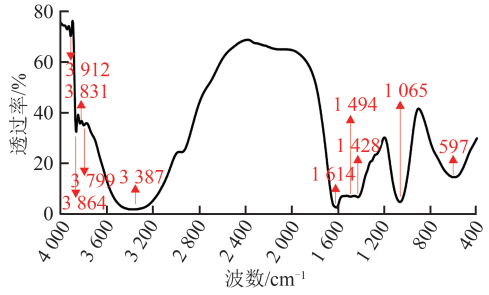


图 5 仙人掌多糖的傅里叶变换红外光谱

Fig. 5 Fourier transform infrared spectrum of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

2.4.4 紫外-可见光谱

仙人掌多糖样品在 200~400 nm 波长范围内的紫外-可见吸收光谱见图 6。在 260 nm 和 280 nm 处均未出现明显的特征吸收峰，表明所得多糖样品中不含可检测的核酸和蛋白质杂质，进一步印证了其较高的纯度。

2.5 抗氧化活性测定结果

DPPH 自由基清除法是评价抗氧化活性的常用方法[46-47]，ORAC 值是评价生物活性成分抗氧化效能的重要指标。结果显示，仙人掌多糖的 DPPH 自由基清除率为 96.27%，ORAC 值为 0.66 mmol/L，表明其具有较强的氧自由基清除能力，这与 DPPH 法的评价结果一致。综上所述，仙人掌多糖在体外模型中显示出较强的抗氧化活性，具

备作为天然抗氧化剂用于食品开发的潜力。为深入探究其细胞层面的抗氧化作用，后续研究建立了H_2O_2诱导的HepaRG细胞氧化应激模型。

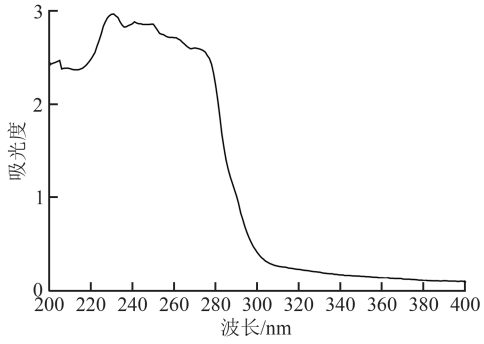


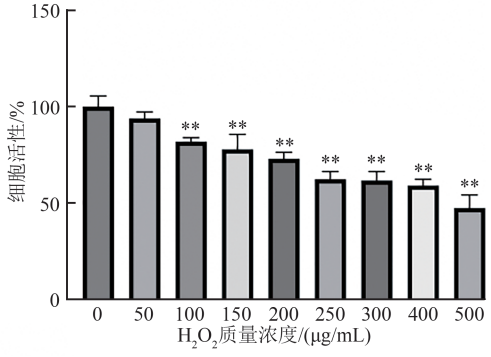
图6　仙人掌多糖的紫外-可见吸收光谱

Fig. 6　UV-Vis absorption spectrum of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica*（L.）Mill.

2.6　H_2O_2诱导的HepaRG细胞氧化应激模型建立

2.6.1　H_2O_2对细胞活性的影响

为了筛选出合适的造模条件，采用CCK-8法检测不同质量浓度H_2O_2处理对HepaRG细胞活性的影响，结果如图7所示。用50 μg/mL H_2O_2处理HepaRG细胞后，细胞活性与对照组相比无显著差异。随着H_2O_2质量浓度升高，细胞活性呈剂量依赖性下降，表明H_2O_2可有效诱导细胞氧化应激。当H_2O_2质量浓度达到200 μg/mL时，细胞活性降低至72.93%，较空白组差异极显著（P<0.000 1）。当H_2O_2质量浓度超过200 μg/mL时，细胞活性进一步降低至70%以下，此时因细胞损伤过于严重，不利于观察后续活性物质的功效作用。因此后续研究选择200 μg/mL H_2O_2作为建立氧化应激模型的诱导条件。



**—与0 μg/mL H_2O_2相比差异极显著（P<0.000 1）。

图7　不同质量浓度H_2O_2对HepaRG细胞活性的影响

Fig. 7　Effect of different mass concentrations of H_2O_2 on the viability of HepaRG cells

2.6.2　仙人掌多糖对细胞活性的影响

不同质量浓度的仙人掌多糖对HepaRG细胞活性的影响见图8。在0.05~5.00 mg/mL质量浓度范围内，经仙人掌多糖处理的细胞活性与对照组相比均无显著差异，表明在该质量浓度范围内仙人掌多糖对细胞无明显毒性。

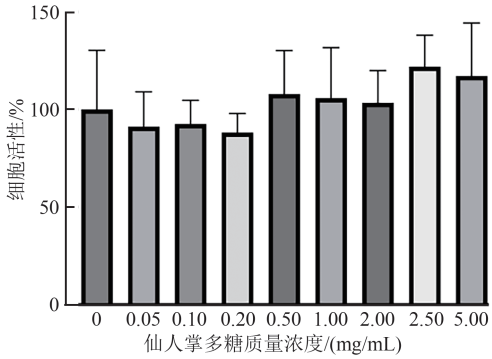


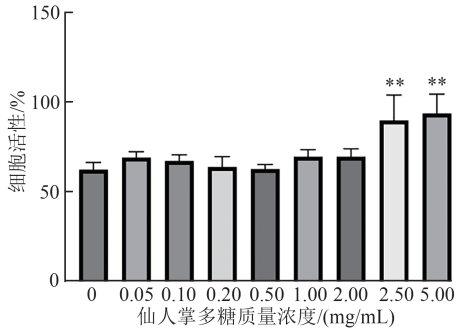
图8　不同质量浓度仙人掌多糖对HepaRG细胞活性的影响

Fig. 8　Effect of different mass concentrations of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica*（L.）Mill. on the viability of HepaRG cells

为筛选仙人掌多糖的干预质量浓度，采用200 μg/mL H_2O_2处理HepaRG细胞，再分别用不同质量浓度的仙人掌多糖进行孵育，并检测其对细胞活性的影响，结果如图9所示。经H_2O_2处理后，HepaRG细胞活性降低至62.26%，分别加入0.05~5.00 mg/mL的仙人掌多糖进行干预，细胞活性均得到不同程度的提升。其中2.50、5.00 mg/mL仙人掌多糖的干预效果最为显著，分别使细胞活性恢复至89.80%和93.64%，且与其他组别有极显著差异（P<0.000 1）。因此，后续研究中选用2.50、5.00 mg/mL作为仙人掌多糖的干预质量浓度。

2.6.3　仙人掌多糖对细胞抗氧化活性的影响

细胞在氧化应激状态会产生过量ROS，当ROS水平超过细胞自身的抗氧化清除能力时，会损伤细胞结构，进而引发炎症反应，并与衰老及多种疾病的发生与发展相关。因此，检测仙人掌多糖对细胞内ROS水平的影响，可评估其缓解氧化损伤的能力，见图10。经H_2O_2处理后，模型组ROS相对表达量极显著升高（P<0.000 1），为对照组的2.20倍，表明氧化应激模型成功建立并导致了ROS的积累。而仙人掌多糖的干预能显著降低损伤细胞内的ROS水平。



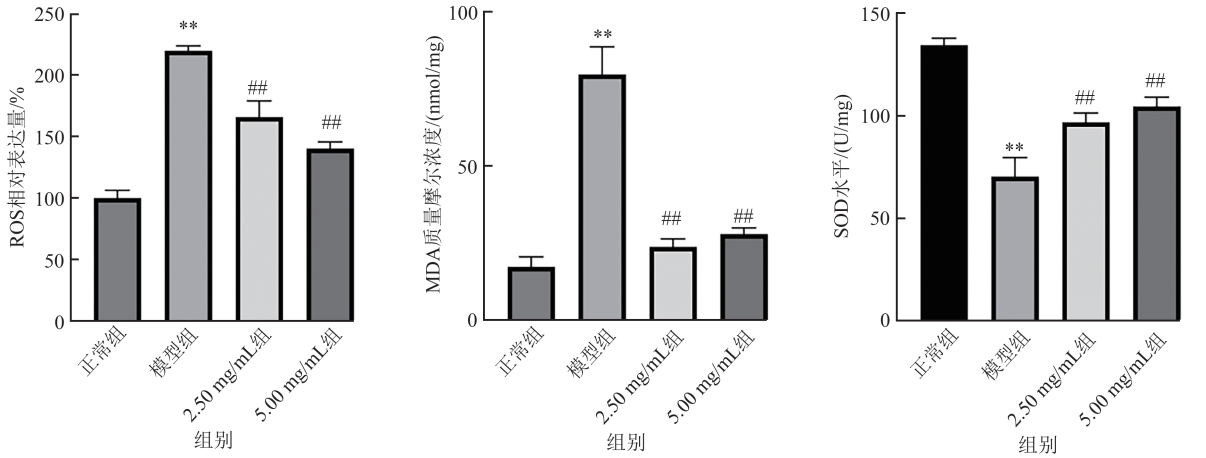
**—与0 mg/mL仙人掌多糖相比差异极显著（P<0.000 1）。

图 9 仙人掌多糖对 H_2O_2 处理后 HepaRG 细胞活性的影响

Fig. 9 Effect of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. on the viability of HepaRG cells treated with H_2O_2

SOD 和 CAT 等是细胞清除自由基的关键酶。SOD 可将超氧阴离子自由基转化为 H_2O_2，然后由 CAT 或 GSH-Px 代谢为水和氧气，从而消除 H_2O_2 的毒性[48]。因此，SOD、GSH-Px、CAT、MDA 的水平常被用作评价氧化应激状态的生物标志物。如图 10（b）所示，经 H_2O_2 处理后，模型组细胞 MDA 水平升高至正常组的 4.64 倍，差异极显著（P<0.000 1），表明 H_2O_2 处理成功诱导了细胞脂质过氧化。经仙人掌多糖处理的细胞，其 MDA 水平极显著低于模型组（P<0.000 1）。

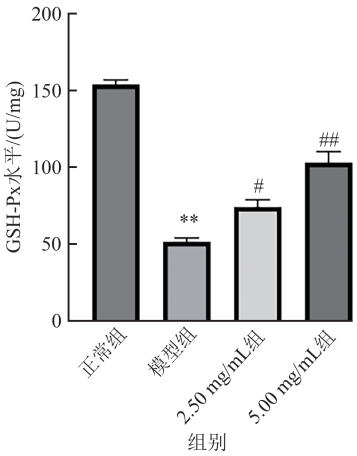
在 H_2O_2 诱导的氧化损伤条件下，模型组细胞中 SOD、GSH-Px 和 CAT 的水平均极显著降低（P<0.000 1），分别降至正常组的 52.34%、33.48% 和 46.21%，见图 10（c）~（d）。经 5.00 mg/mL 仙人掌多糖干预后，3 种抗氧化酶的水平均得到极显著提升（P<0.000 1）。当仙人掌多糖质量浓度为 5.00 mg/mL 时，细胞内 SOD、GSH-Px 和 CAT 水平分别较模型组升高 48.58%、99.86% 和 70.32%。以上结



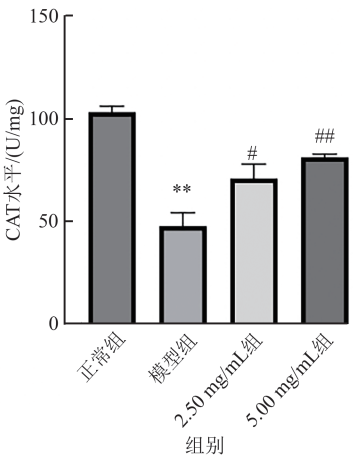
(a) 仙人掌多糖对细胞ROS相对表达量的影响

(b) 仙人掌多糖对细胞MDA水平的影响

(c) 仙人掌多糖对细胞SOD水平的影响



(d) 仙人掌多糖对细胞GSH-Px水平的影响



(e) 仙人掌多糖对细胞CAT水平的影响

**—与正常组相比差异极显著（P<0.000 1）；#—与模型组相比差异显著（P<0.05）；##—与模型组相比差异极显著（P<0.000 1）。

图 10 仙人掌多糖对 H_2O_2 处理后 HepaRG 细胞抗氧化活性的影响

Fig. 10 Effect of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. on the antioxidant activity of HepaRG cells treated with H_2O_2

果表明，仙人掌多糖可以通过提升细胞抗氧化酶SOD、GSH-Px、CAT的活性，并抑制ROS和MDA等过氧化产物的产生，保护HepaRG细胞免受H_2O_2诱导的氧化应激损伤。

3 结论

本研究以梨果仙人掌多糖的抗氧化活性为切入点，通过单因素和正交试验优化了其热水提取工艺，最佳参数为提取时间2.5 h、料液比1 g∶30 mL、提取温度70 ℃。优化后，采用乙醇反复洗脱有效降低了提取物中蒽醌的残留，提升了食用安全性。结构表征结果表明，所得仙人掌多糖由9种单糖组成，其中阿拉伯糖相对含量最高。高效凝胶色谱显示其为重均分子量分布不均一的杂多糖。仙人掌多糖的紫外-可见光谱在260、280 nm处无特征吸收峰，傅里叶红外光谱显示出典型的多糖特征吸收峰，共同证明产物纯度较高。活性研究显示，该多糖具有良好的体外抗氧化能力。在H_2O_2诱导的HepaRG细胞氧化应激模型中，能够提高细胞存活率，降低细胞内ROS及MDA水平，有效提升SOD、GSH-Px和CAT的活性，表明其可通过增强细胞内源性抗氧化酶活力来缓解氧化损伤。

综上所述，本研究建立了可显著降低蒽醌残留的梨果仙人掌多糖制备工艺，并系统证实了其细胞水平的抗氧化功效，为其作为功能性食品配料的应用提供了参考。后续研究需对多糖组分进一步纯化，并通过体内试验验证其功能特性，为相关产品的开发提供理论支持。

参考文献

[1] GRIFFITH M P. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence [J]. American Journal of Botany, 2004, 91(11): 1915-1921.

[2] 秦丹，谢学强. 大渡河谷梨果仙人掌资源调查及开发利用[J]. 安徽农业科学，2015，43(11)：8-10.
QIN D, XIE X Q. Resources investigation to *Opuntia ficus-indica* in Dadu River valley and development and utilization [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(11): 8-10. (in Chinese)

[3] ABBAS E Y, EZZAT M I, EL HEFNAWY H M, et al. An overview and update on the chemical composition and potential health benefits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(11): e14310.

[4] Xu Y, Wang L, He J, et al. Prevalence and control of diabetes in Chinese adults [J]. Journal of the American Medical Association, 2013, 310(9): 948-959.

[5] ZHAO L Y, LAN Q J, HUANG Z C, et al. Antidiabetic effect of a newly identified component of *Opuntia dillenii* polysaccharides [J]. Phytomedicine, 2011, 18 (8/9): 661-668.

[6] ZHAO L Y, HUANG W, YUAN Q X, et al. Hypolipidaemic effects and mechanisms of the main component of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharides in high-fat emulsion-induced hyperlipidaemic rats [J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 964-971.

[7] 杨艳，周欣，陈华国. 仙人掌多糖提取、纯化、结构表征及生物活性研究进展[J]. 食品与机械，2022，38(5)：216-225.
YANG Y, ZHOU X, CHEN H G. Research progress on extraction, purification, analysis and biological activity of polysaccharides from *Opuntia dillenii* Haw. [J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 216-225. (in Chinese)

[8] LIANG X X, GAO Y Y, PAN Y, et al. Purification, chemical characterization and antioxidant activities of polysaccharides isolated from *Mycena dendrobii* [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 203: 45-51.

[9] JRIDI M, NASRI R, MARZOUGUI Z, et al. Characterization and assessment of antioxidant and antibacterial activities of sulfated polysaccharides extracted from cuttlefish skin and muscle [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 1221-1228.

[10] SALEHI E, EMAM-DJOMEH Z, ASKARI G, et al. *Opuntia ficus indica* fruit gum: extraction, characterization, antioxidant activity and functional properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 206: 565-572.

[11] CIRIMINNA R, DELISI R, ALBANESE L, et al. *Opuntia ficus-indica* seed oil: biorefinery and bioeconomy aspects [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(8): 1700013.

[12] ALI S K, MAHMOUD S M, EL-MASRY S S, et al. Phytochemical screening and characterization of the antioxidant, anti-proliferative and antibacterial effects of different extracts of *Opuntia ficus-indica* peel [J]. Journal of King Saud University-Science, 2022, 34(7): 102216.

[13] ALQURASHI A S, AL MASOUDI L M, HAMDI H, et al. Chemical composition and antioxidant, antiviral, antifungal, antibacterial and anticancer potentials of *Opuntia ficus-indica* seed oil [J]. Molecules, 2022, 27(17): 5453.

[14] BLANDO F, RUSSO R, NEGRO C, et al. Antimicrobial and antibiofilm activity against *Staphylococcus aureus* of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cladode polyphenolic

extracts[J]. Antioxidants,2019,8(5):117.
[15] SARAVANAKUMAR A, GANESH M, PENG M M, et al. Comparative antioxidant and antimycobacterial activities of *Opuntia ficus-indica* fruit extracts from summer and rainy seasons[J]. Frontiers in Life Science, 2015,8(2):182-191.
[16] CHOUGUI N,TAMENDJARI A,HAMIDJ W,et al. Oil composition and characterisation of phenolic compounds of *Opuntia ficus-indica* seeds[J]. Food Chemistry,2013, 139(1/2/3/4):796-803.
[17] LEE J C,KIM H R,KIM J,et al. Antioxidant property of an ethanol extract of the stem of *Opuntia ficus-indica* var. *saboten*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002,50(22):6490-6496.
[18] OUERGHEMMI I,HARBEOUI H,AIDI WANNES W,et al. Phytochemical composition and antioxidant activity of Tunisian *cactus* pear (*Opuntia ficus indica* L.) flower [J]. Journal of Food Biochemistry,2017,41(5):e12390.
[19] 杨艳. 米邦塔仙人掌多糖的选择性提取与生物活性评价研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2023.
[20] YAN Y J, LI X, WAN M J, et al. Effect of extraction methods on property and bioactivity of water-soluble polysaccharides from *Amomum villosum*[J]. Carbohydrate Polymers,2015,117:632-635.
[21] LI X Y, WANG L. Effect of extraction method on structure and antioxidant activity of *Hohenbuehelia serotina* polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2016,83:270-276.
[22] MOHAN K N,MURALISANKAR T,UTHAYAKUMAR V, et al. Trends in the extraction, purification, characterisation and biological activities of polysaccharides from tropical and sub-tropical fruits: a comprehensive review[J]. Carbohydrate Polymers,2020, 238:116185.
[23] YANG S Y,LI Y,JIA D Y,et al. The synergy of Box-Behnken designs on the optimization of polysaccharide extraction from mulberry leaves[J]. Industrial Crops and Products,2017,99:70-78.
[24] CAI W, GU X, TANG J. Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 71(3): 403-410.
[25] CHEN C L, KASIMU R, XIE X Y, et al. Optimised extraction of *Erythronium sibiricum* bulb polysaccharides and evaluation of their bioactivities [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2016,82:898-904.
[26] XIA Y G, KUANG H X, YANG B Y, et al. Optimum extraction of acidic polysaccharides from the stems of *Ephedra sinica* Stapf by Box-Behnken statistical design and its anti-complement activity [J]. Carbohydrate Polymers,2011,84(1):282-291.
[27] YAN Y L, YU C H, CHEN J, et al. Ultrasonic-assisted extraction optimized by response surface methodology, chemical composition and antioxidant activity of polysaccharides from *Tremella mesenterica* [J]. Carbohydrate Polymers,2011,83(1):217-224.
[28] WEI Y J, HAN I K, HU M, et al. Personal exposure to particulate PAHs and anthraquinone and oxidative DNA damages in humans[J]. Chemosphere, 2010, 81(10): 1280-1285.
[29] OHKUMA Y, HIRAKU Y, KAWANISHI S. Sequence-specific DNA damage induced by carcinogenic danthron and anthraquinone in the presence of Cu(II), cytochrome P450 reductase and NADPH[J]. Free Radical Research, 2001,34(6):595-604.
[30] KUBÁTOVÁ A, DRONEN L C, PICKLO M J, et al. Midpolarity and nonpolar wood smoke particulate matter fractions deplete glutathione in RAW 264.7 macrophages [J]. Chemical Research in Toxicology, 2006, 19(2): 255-261.
[31] MISAKI K, TAKAMURA-ENYA T, OGAWA H, et al. Tumour-promoting activity of polycyclic aromatic hydrocarbons and their oxygenated or nitrated derivatives [J]. Mutagenesis,2016,31(2):205-213.
[32] SHUKLA V,ASTHANA S,GUPTA P,et al. Toxicity of naturally occurring anthraquinones[M]//FISHBEIN J C, HEILMAN J M. Advances in Molecular Toxicology. Amsterdam:Elsevier,2017:1-50.
[33] 张寅,南志光,卢从飞,等. 柿江珧多糖纳米硒的制备、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械,2025, 41(1):53-62.
ZHANG Y, NAN Z G, LU C F, et al. Preparation, structural characterization and antioxidant activity of selenium nanoparticles decorated by *Atrina pectinata* polysaccharides[J]. Food & Machinery, 2025, 41(1): 53-62.(in Chinese)
[34] 谢存一,李剑梅,郭玲玲,等. 桑黄发酵液胞外多糖含量测定方法的比较及优化[J]. 食用菌,2022,44(6): 69-73.
XIE C Y, LI J M, GUO L L, et al. Comparison and optimization of determination methods of extracellular polysaccharides in fermentation broth of Sanghuang mushroom[J]. Edible Fungi, 2022, 44(6): 69-73.(in Chinese)
[35] 许芳瑞,刘新艳,刘茜,等. 绞股蓝中总皂苷含量测定方法[J]. 食品工业,2023,44(4):138-141.

XU F R，LIU X Y，LIU Q，et al. Determination of gypenosides in *Gynostemma pentaphyllum*[J]. The Food Industry，2023，44(4)：138-141.(in Chinese)

[36] OUASSOU H，BOUHRIM M，BENCHEIKH N，et al. *In vitro* antioxidant properties，glucose-diffusion effects，α-amylase inhibitory activity，and antidiabetogenic effects of *C. europaea* extracts in experimental animals[J]. Antioxidants，2021，10(11)：1747.

[37] 阿不力米提•玉麦尔，库尔班江•巴拉提. 紫外可见分光光度法测定白喉乌头中总生物碱的含量[J]. 北方园艺，2022(12)：94-98.
YUMAIER A，BRAD K. Determination of total alkaloids in *Aconitum leucostomum* by UV-vis spectrophotometry[J]. Northern Horticulture，2022(12)：94-98.(in Chinese)

[38] 白光辉，李海漫，董新玉，等. 虾夷扇贝裙边多糖的结构及生物活性[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(12)：92-100.
BAI G H，LI H M，DONG X Y，et al. Structure and biological activity of polysaccharides from *Patinopecten yessoensis* skirt[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(12)：92-100.(in Chinese)

[39] 余梅，焦迎春. 柴达木大肥菇多糖的体内外抗氧化活性研究[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(12)：101-109.
YU M，JIAO Y C. Study on *in vivo* and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Agaricus bitorquis*(Quél.) Sacc.[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(12)：101-109.(in Chinese)

[40] 张江涛，张铭皓，高丽辉，等. 模拟胃肠道消化对玉米低聚肽抗氧化作用的影响[J]. 食品与生物技术学报，2021，40(11)：54-61.
ZHANG J T，ZHANG M H，GAO L H，et al. Effect of simulated gastrointestinal digestion on antioxidant activity of corn oligopeptides[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2021，40(11)：54-61.(in Chinese)

[41] CHEN X L，LI L Y，ZHU W Q，et al. Fabrication of caffeoylquinic acid-loaded burdock polysaccharide nanoparticles and their antioxidant activity in hydrogen peroxide-damaged HepaRG cells[J]. Food Chemistry：X，2024，22：101293.

[42] 谢倩倩，宋雁，雍凌，等. 边销茶中蒽醌污染状况及其暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志，2023，35(07)：1057-1062.
XIE Q Q，SONG Y，YONG L，et al. Anthraquinone contamination levels and exposure risk assessment in tea for sale in border areas[J]. Chinese Journal of Food Hygiene，2023，35(07)：1057-1062.(in Chinese)

[43] 黄媛，吕锡源. 减肥类保健食品中总蒽醌限量要求分析[J]. 品牌与标准化，2022(4)：71-73.
HUANG Y，LÜ X Y. Analysis of limit requirements of total anthraquinone content in health weight-reducing food[J]. Brand & Standardization，2022(4)：71-73.(in Chinese)

[44] ZHAO M M，YANG N，YANG B，et al. Structural characterization of water-soluble polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladodes in relation to their anti-glycated activities[J]. Food Chemistry，2007，105(4)：1480-1486.

[45] 赵倩. 西藏梨果仙人掌基本营养成分分析及茎粗多糖活性效果评价[D]. 林芝：西藏农牧学院，2021.

[46] BI H T，GAO T T，LI Z H，et al. Structural elucidation and antioxidant activity of a water-soluble polysaccharide from the fruit bodies of *Bulgaria inquinans*(Fries)[J]. Food Chemistry，2013，138(2/3)：1470-1475.

[47] XU Y Q，CAI F，YU Z Y，et al. Optimisation of pressurised water extraction of polysaccharides from blackcurrant and its antioxidant activity[J]. Food Chemistry，2016，194：650-658.

[48] NAJI K M，AL-SHAIBANI E S，ALHADI F A，et al. Hepatoprotective and antioxidant effects of single clove garlic against CCl_4-induced hepatic damage in rabbits[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine，2017，17(1)：411.